

На правах рукописи



КУХАРЬ ИЛЬЯ ДМИТРИЕВИЧ

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН,
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата

технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

Научный руководитель

Соловьев Вадим Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты

Коротких Дмитрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор.

Клюев Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», доцент.

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»

Защита состоится «2» марта 2020 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.138.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, студия 9 (открытая сеть).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» www.mgsu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Александрова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные тенденции развития строительной отрасли обуславливают широкое применение различных видов композиционных материалов, одним из которых является фибробетон. Однако, существующие фибробетоны имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение: сталефибробетон имеет высокий коэффициент тепло- и электропроводности, в стекло- и базальтофибробетоне со временем наблюдается деструкция волокон, а кроме того, используемые дисперсно-армирующие элементы разрушаются под воздействием определенных агрессивных сред.

Одним из наиболее перспективных направлений исследований и разработки является получение бетонов, дисперсно-армированных углеродным волокном, которое за счет высоких физико-механических показателей, обеспечивает фибробетону повышенную прочность при растяжении, модуль упругости и стойкость к большинству агрессивных сред.

Работа выполнена в рамках отраслевой программы внедрения композиционных материалов, конструкций и изделий из них в строительном комплексе Российской Федерации в 2014-2020 годах, утвержденной Министерством регионального развития РФ 24 июля 2013 г., а также программы Федерального дорожного агентства по внедрению композиционных материалов (композитов), конструкций и изделий из них в 2015-2020 годах.

Степень разработанности темы

В ходе работы над диссертационным исследованием был выполнен анализ данных, приведенных в научных и патентных источниках. По результатам установлено, что широкому распространению углеродного волокна как армирующего элемента в бетонных системах препятствует его низкое сцепление с цементно-песчаной матрицей.

Соответственно, указанная причина не позволяет использовать весь потенциал фибрового армирования бетонов углеродным волокном. Результаты анализа работ, посвященных данной тематике, позволяют сделать вывод о нескольких основных возможных способах увеличения сцепления волокна с толщей бетона, а именно:

1. Механическим путем – воздействие на волокно с целью изменения структуры его поверхности;
2. Модификация бетонной матрицы для создания обжатия волокон;
3. Модификация поверхности волокна химическим путем (аппретирование волокон);
4. Применение полимерных добавок.

При этом, вопрос разработки методов и технологических приемов по увеличению степени вовлеченности углеродного волокна в работу бетона остается открытым и является материалом для значительного количества научно-исследовательских работ.

Цели и задачи работы.

Цель работы: Разработка мелкозернистых бетонов с повышенными эксплуатационными свойствами, дисперсно-армированных углеродным волокном.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка способа изготовления бетонных смесей, содержащих равномерно распределённое углеродное волокно;
- обоснование возможности эффективного совместного использования углеродных волокон и эпоксидной смолы в мелкозернистых бетонах;
- исследование и оценка влияния эпоксидной смолы на сцепление углеродного волокна с бетонной матрицей;
- получение количественных зависимостей, определяющих основные свойства фибробетонов в зависимости от состава бетонной матрицы, содержания эпоксидной смолы и углеродного волокна;
- исследование физико-механических и эксплуатационных свойств оптимальных составов разработанных фибробетонов;
- разработка практических рекомендаций и производственная апробация полученных фибробетонов с полимерной добавкой.

Научная новизна работы.

Установлено, что при введении агрегативно-устойчивой эмульсии эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 в мелкозернистую бетонную смесь, на углеродных волокнах образуется устойчивый поверхностный слой смолы, который приводит к формированию мелкокристаллических продуктов гидратации портландцемента на границе «цементный камень-углеродное волокно», что обеспечивает повышение сцепления волокон с цементным камнем, увеличение прочностных и эксплуатационных свойств дисперсно-армированных бетонов.

Установлены экспериментальные зависимости, демонстрирующие влияние эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 на прочностные и эксплуатационные свойства бетонов, дисперсно-армированных углеродным волокном, которые дополняют теоретические и практические результаты теории композиционных материалов.

Теоретическая значимость работы.

Обоснована возможность получения эффективных мелкозернистых бетонов дисперсно-армированных углеродным волокном, за счет введения в состав агрегативно-устойчивой полимерной эмульсии, которая адсорбируется на поверхности

волокон и приводит к формированию мелкокристаллических продуктов гидратации портландцемента на границе «цементный камень - углеродное волокно», которые повышают сцепление волокон с цементным камнем и обеспечивают повышенные прочностные и эксплуатационные свойства.

Практическая значимость работы.

Разработаны составы и технологические решения получения эффективных мелкозернистых бетонов дисперсно-армированных углеродным волокном (при содержании ДЭГ-1 в количестве 1,5% от массы цемента и дозировке волокна 1 кг/м³), со следующими свойствами: прочность при сжатии 78,6 МПа (увеличение до 25,4%), прочность на растяжение при изгибе 12,1 МПа (увеличение до 42,4%), морозостойкость F₂₄₀₀ (увеличение марки на 2 ступени), водонепроницаемость W20 (увеличение марки на 5 ступеней)

Разработаны рекомендации по технологии производства бетонной смеси с углеродным волокном, обеспечивающие его равномерное распределение по объему и предотвращающие «комкование».

Получены экспериментальные зависимости влияния эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 на свойства бетона с углеродным волокном, дающие возможность проектирования бетонов с прогнозируемыми физико-механическими свойствами.

Методология и методы диссертационной работы.

Методологической основой исследования являлись теоретические и эмпирические методы, базирующиеся на сборе информации, ее систематизации, экспериментальных данных, анализе результатов, методах компьютерного, статистического и математического моделирования. Методология исследования основывалась на использовании базовых и фундаментальных положений теории бетонов и композиционных материалов.

Испытания, выполненные в ходе проведения экспериментальной части исследования, проводились в лабораторных условиях в соответствии с действующими ГОСТами и по специальной методике для определения показателя сцепления углеродного волокна с цементно-песчаной матрицей, с использованием материально-технической базы Национального исследовательского Московского государственного строительного университета.

Положения, выносимые на защиту:

– обоснование возможности получения бетонов дисперсно-армированных углеродным волокном с повышенными прочностными и эксплуатационными свойствами за счет дополнительного введения эмульсии эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921;

– результаты экспериментальных исследований влияния содержания эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 на физико-механические свойства мелкозернистых бетонов;

– зависимости прочностных и эксплуатационных свойств фибробетонов с углеродным волокном от рецептурных факторов, содержания добавки и коэффициента армирования;

– результаты технико-экономической оценки и опытного апробирования разработанного фибробетона.

Степень достоверности.

Высокая степень достоверности достигнута и обеспечена использованием современного исследовательского оборудования; применением стандартных методов испытаний; сопоставлением полученных результатов с исследованиями отечественных и зарубежных авторов по схожим тематикам; положительными результатами промышленной апробации.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и семинарах: научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные науки сегодня» (Северный Чарльстон, США, 2018); научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований» (Москва, 2018); научно-практической конференции «Вестник современных исследований» (Омск, 2018); научно-практической конференции «Фундаментальные прикладные разработки в области технических и физико-математических наук» (Казань, 2018); MATEC Web of conferences (Хошимин, Вьетнам, 2018).

Личный вклад соискателя заключается в изучении теоретических основ для разработки эффективного фибробетона с углеродным волокном с заданными эксплуатационными свойствами; подготовке и проведении экспериментальных исследований по разработке эффективных бетонов, дисперсно-армированных углеродным волокном; опытной апробации результатов диссертационного исследования; подготовке научных публикаций по результатам выполненных работ.

Внедрение результатов.

При содействии специалистов ООО «Трансмост Сочи» был изготовлен элемент несъемной опалубки из разработанного мелкозернистого бетона с углеродным волокном. Формование элемента происходило в подготовленной форме непосредственно на объекте строительства: *«Создание сухогрузного района морского порта «Тамань», а именно: «Строительство объектов железнодорожной инфраструктуры участка от ПК 314 до ПК 362. Строительство железнодорожного путепровода на ПК 329+50»*. Площадь готового изделия составила 6,8 м². В ре-

зультате использования данной несъемной опалубки получен суммарный *экономический эффект в размере 6643,06 рублей* за счет снижения трудозатрат при проведении строительно-монтажных работ, а также снижения затрат на защиту возводимой конструкции от воздействия окружающей агрессивной среды путем нанесения антикоррозийного покрытия и устройства гидроизоляции.

Публикации. Материалы диссертации достаточно полно изложены в 6 научных публикациях, из которых 4 работы опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), и 1 работа опубликована в журнале, индексируемом в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и других.

В диссертации использованы результаты научных работ, выполненных автором – соискателем ученой степени кандидата технических наук – лично и в соавторстве. Список опубликованных научных работ И.Д. Кухаря в последнем разделе автореферата.

Объем и структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 123 страницах текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений, включает 28 рисунков и 36 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проведенный литературный анализ по вопросу использования в бетоне углеродного волокна свидетельствует о том, что эффективность применения данных волокон напрямую зависит от степени их вовлеченности в работу композита, при этом общепринятых массово применяемых способов увеличения сцепления между волокном и бетонной матрицей нет. В связи с этим, целью данной диссертационной работы стала разработка способов повышения эффективности применения углеродного волокна и его использования в бетонных смесях.

В силу высокой стоимости углеродного волокна его применение в композиционных бетонных системах целесообразно только в конструкциях специального назначения, где особенности и условия эксплуатации не позволяют решить поставленную техническую задачу за счет использования тяжелого бетона или сталефибробетона.

При использовании разрабатываемых составов в подобных конструкциях, особенно, при изготовлении элементов несъемной опалубки, к ним предъявляются повышенные требования по прочностным и эксплуатационным характеристикам, а именно:

- прочность на растяжение при изгибе более 10 МПа;
- прочность на сжатие более 60 МПа;
- морозостойкость более F₂₀₀;

- водонепроницаемость не менее W20.

В работе использовались портландцемент ПЦ 500-Д0-Н, соответствующий требованиям ГОСТ 10178, песок крупный I класса по ГОСТ 8736-2014, микрокремнезем конденсированный МКУ 85 по ТУ 5743-048-02495332-96 с удельной поверхностью 15 м²/г, углеродное волокно FibARM Fiber C* (холдинговая компания «Композит») по СТО 75969440-020-2011 без аппретирования поверхности с длиной 6 мм и плотностью 1,8 г/см³. В качестве добавок использовались: гиперпластификатор на основе поликарбоксилата SikaViscoCrete 5–New (SVC5N), соответствующий требованиям ГОСТ 30459-2008, отвердитель №921 по ТУ 2433-065-04689375-2003 и эпоксидная смола ДЭГ-1 по ТУ 2225-390-04872688-2016, которая представляет собой продукт конденсации эпихлоргидрина с диэтиленгликолем и содержит не менее 26% эпоксидных групп. В работе применялось современное оборудование НИУ МГСУ и стандартные методики определения свойств.

На первом этапе выполнения экспериментальной части были проведены исследования по изучению влияния от добавления углеродного волокна (далее УВ) в количестве 1 кг/м³ на свойства смесей, а также определение оптимального режима введения волокон в состав на этапе перемешивания компонентов (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты по определению оптимального режима изготовления бетонной смеси с углеродным волокном

| № п/п | Бетонная смесь | Удобоукладываемость, см / сек | Средняя плотность, кг/м ³ | Расслаиваемость, % | | Воздуховлечение, % |
|-------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | | | | Водотделение | Раствороотделение | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | Контрольный состав №1 без УВ | 12 / - | 2270 | 0,6 | 3,4 | 2,9 |
| 2 | Фибробетонная смесь №1 с УВ | 8 / - | 2250 | 0,3 | 1,5 | 3,8 |
| 3 | Контрольный состав №2 без УВ | 9 / - | 2260 | 0,4 | 2,9 | 2,7 |
| 4 | Фибробетонная смесь №2 с УВ | 4 / - | 2250 | 0,2 | 1,5 | 3,3 |
| 5 | Контрольный состав №3 без УВ | 2 / - | 2280 | 0,3 | 2,2 | 2,5 |
| 6 | Фибробетонная смесь №3 с УВ | 1 / - | 2260 | 0,1 | 1,3 | 2,9 |
| 7 | Контрольный состав №4 без УВ | - / 6 | 2290 | 0,2 | 2,6 | 2,4 |
| 8 | Фибробетонная смесь №4 с УВ | - / 7 | 2280 | 0,1 | 1,1 | 2,5 |
| 9 | Контрольный состав №5 без УВ | - / 15 | 2310 | 0,2 | 2,2 | 2,3 |
| 10 | Фибробетонная смесь №5 с УВ | - / 16 | 2320 | 0,1 | 1,0 | 2,3 |

По результатам выполненных испытаний установлено, что:

1. Наилучшее распределение УВ достигается при следующей последовательности изготовления фибробетонных смесей:

- совместная загрузка и перемешивание цемента, песка и УВ в течение 40...50 секунд;

- частичная загрузка воды и перемешивание до получения фибробетонной смеси марки по удобоукладываемости не выше Ж1;

- добавление остальной воды и перемешивание до получения требуемой марки по удобоукладываемости (для составов с маркой по удобоукладываемости выше Ж1).

2. Введение УВ в бетонные смеси марки по удобоукладываемости П2 и выше, приводит к снижению марки на единицу.

3. Введение УВ в бетонные смеси марки по удобоукладываемости П1 и ниже не влияет на удобоукладываемость.

4. Введение УВ в бетонные смеси в количестве 1 кг/м^3 значительно улучшает их расслаиваемость. Для фибробетонных смесей с маркой по удобоукладываемости П1..П3 значения водоотделения и растовороотделения составляют 0,1...0,3 и 1,3...1,5 % (нормативные значения не более 0,4 и 3 соответственно). Для бетонной смеси с маркой по удобоукладываемости Ж1 и Ж2 значения водоотделения и растовороотделения составляют 0,1 и 1,0...1,1% (нормативные значения не более 0,2 и 3 соответственно).

5. Введение УВ в бетонную смесь увеличивает воздухововлечение: для подвижных смесей П1...П3 на 0,5...0,9%, для жестких Ж1, Ж2 – до 0,1 %.

Для определения оптимального содержания волокна в разрабатываемом дисперсно-армированном бетоне было использовано математическое планирование эксперимента. Принятые факторы (водоцементное отношение и содержание углеродного волокна) и уровни их варьирования приведены в таблице 2. Выбор факторов и уровней их варьирования основан на результатах предварительных исследований.

Таблица 2 – Факторы и уровни варьирования

| Факторы | Обозначение | Уровни варьирования | | |
|---|-------------|---------------------|------|------|
| | | -1 | 0 | +1 |
| Водоцементное отношение, В/Ц | X_1 | 0,40 | 0,48 | 0,58 |
| Содержание углеродного волокна, кг/м^3 | X_2 | 1 | 3 | 5 |

Для получения математической модели был использован ортогональный центрально-композиционный план второго порядка.

В результате проведенных вычислений получены следующие математические модели для проектирования тяжелых бетонов с углеродным волокном, в кодированных факторах:

$$R_{сж} = 50,2 - 14,7X_1 + 0,9X_1X_2 + 3,8X_1^2 + 1,3X_2^2;$$

$$R_{изг} = 6,1 - 1,3X_1 + 0,5X_2 + 0,3X_1X_2 + 0,3X_1^2;$$

$$\rho = 2307,2 - 78,3X_1;$$

$$w = 3,6 + 0,8X_1 + 0,3X_1^2.$$

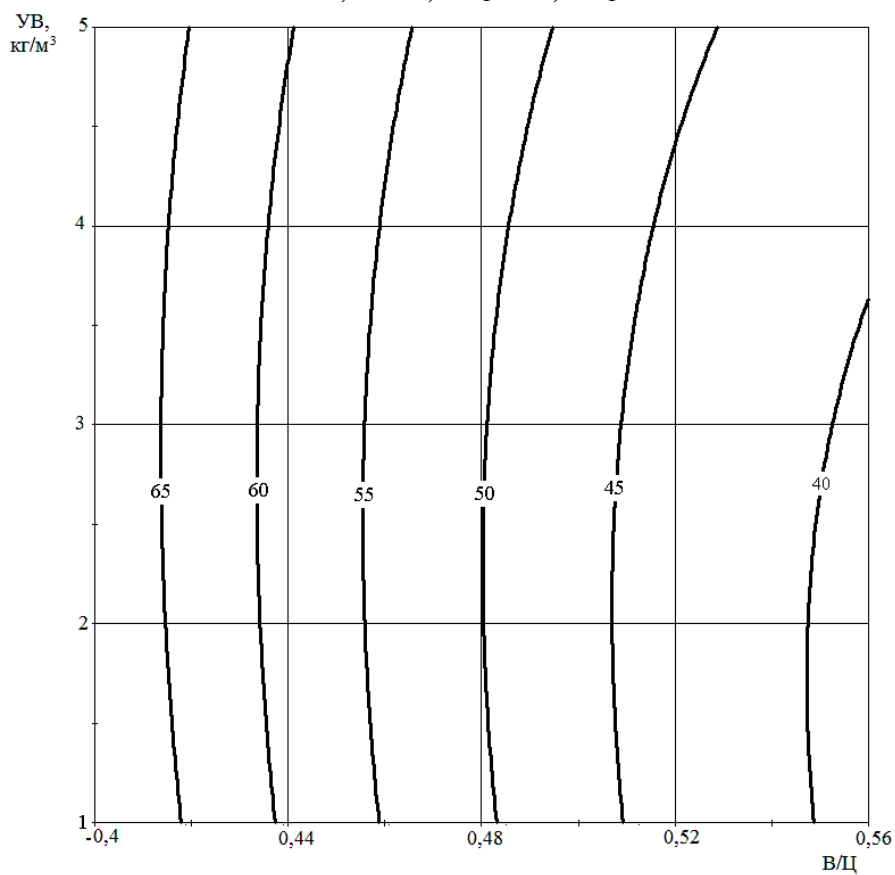


Рисунок 1- Влияние В/Ц и УВ на прочность при сжатии фибробетона

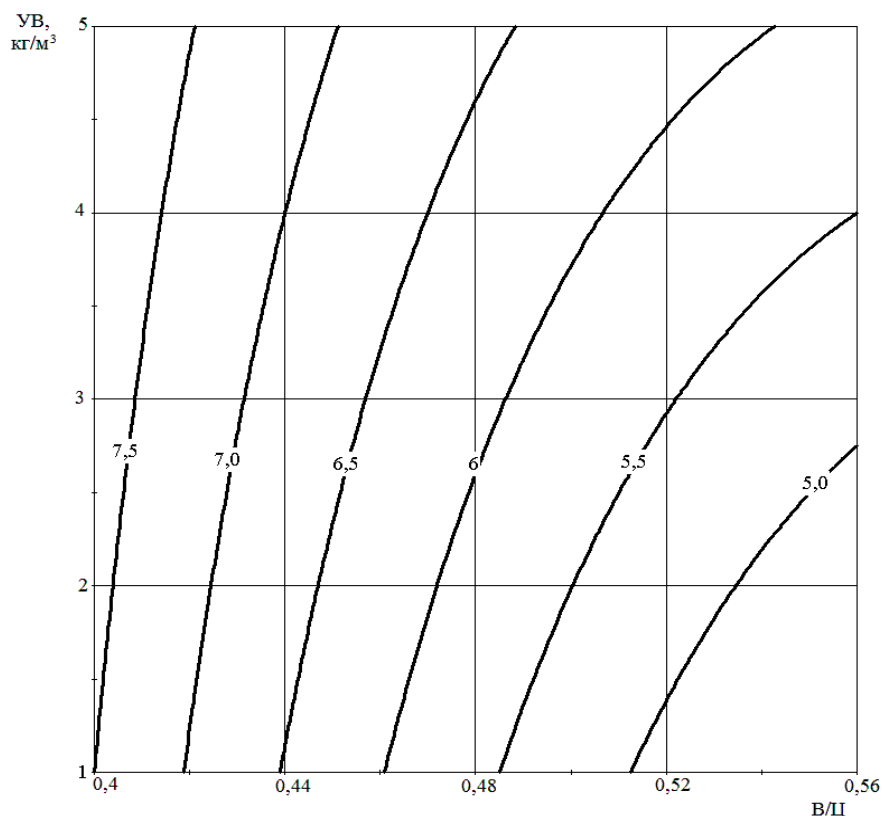


Рисунок 2- Влияние В/Ц и УВ на прочность на растяжение при изгибе

Изолинии регрессионных моделей для прочности при сжатии и изгибе приведены на рисунках 1 и 2, согласно которым, введение углеродного волокна не влияет на прочность при сжатии и незначительно увеличивает прочность при изгибе. Плотность и водопоглощение исследуемых бетонов при введении УВ в количестве 1...5 кг/м³ изменяется незначительно.

В дальнейшем исследовании было оценено влияния количественного содержания волокна в бетоне (от 1 до 3 кг/м³, что соответствует коэффициенту армирования (μ_v , %) от 0,56 до 1,67) на прочностные характеристики фибробетонов, составы которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения прочностных характеристик контрольных составов

| Компонент бетона | Расход компонентов на 1 м ³ бетона | | |
|--|---|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Номер состава | 1 | 2 | 3 |
| Цемент, кг | 690 | 690 | 690 |
| Песок, кг | 1380 | 1380 | 1380 |
| Микрокремнезем, кг | 34,5 | 34,5 | 34,5 |
| Гиперпластификатор, л | 1,2 | 1,8 | 2,4 |
| Вода, л | 280 | 260 | 240 |
| Предел прочности на сжатие, МПа | 49,8 | 55,1 | 62,7 |
| Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа | 7,4 | 8,1 | 8,5 |

Анализ данных, приведенных на рисунках 3 и 4, показал, что оптимальным содержанием волокна является дозировка 1 кг/м^3 , которая позволяет увеличить прочностные характеристики состава.

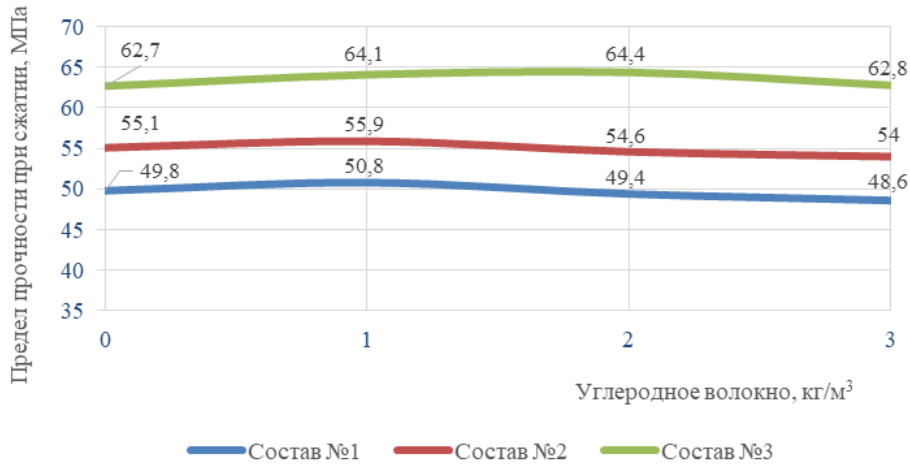


Рисунок 3 – Результаты определения прочности при сжатии составов с углеродным волокном

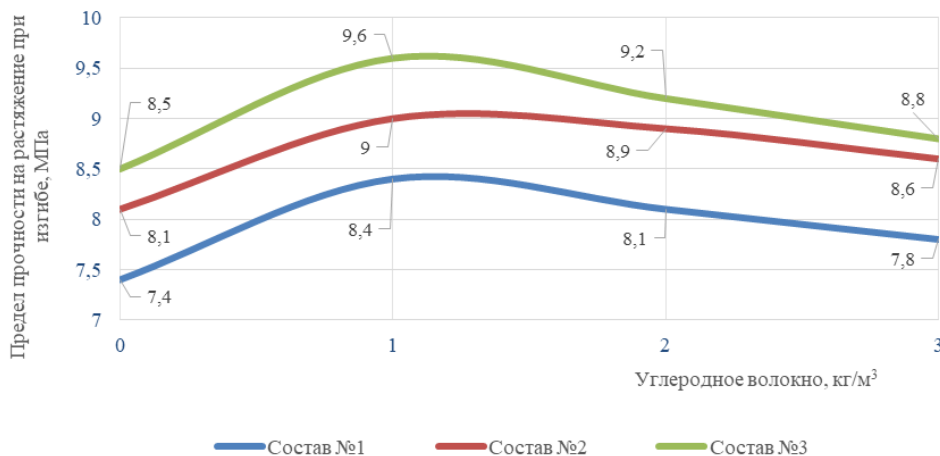


Рисунок 4 – Результаты определения прочности на растяжение при изгибе составов с углеродным волокном

При этом, прирост по прочности при использовании волокна без добавок в составе (максимум до 20% для прочности на растяжение при изгибе) остается незначительным.

Полученные результаты подтвердили, что адгезия между цементной матрицей и УВ очень низкая и не приводит к значительному увеличению прочностных свойств. В качестве дальнейшего направления исследований по увеличению сцепления между УВ и матрицей была подробно рассмотрена возможность введения полимерных добавок из-за ее простой реализации и технологичности.

Образование тонкой пленки на поверхности входящих в бетонную смесь компонентов (вяжущее, заполнитель) является основным механизмом действия поли-

мерных добавок. Такая пленка обладает хорошей адгезией, что способствует увеличению физико-механических показателей бетона. Самыми распространенными полимерными добавками в цементные системы являются поливинилацетат (ПВА), водорастворимые смолы, латексы и др. Для предварительной оценки эффективности применения различных полимеров при решении поставленной задачи были проведены: литературный анализ, рассмотрение известных химических реакций, проведение испытания бетона с подобными добавками и углеродным волокном. По результатам анализа установлено, что наиболее подходящими в данном случае являются эпоксидные смолы, так как при использовании других добавок повышение показателей бетонов не выявлено.

При этом, необходимо использовать жидкие низковязкие смолы, наиболее способные эмульгироваться в водной среде, так как вода, являясь очень полярным протонсодержащим растворителем, ускоряет взаимодействие эпоксидной смолы с аминами, что сокращает жизнеспособность водоразбавляемых композиций по сравнению с органорастворимыми. Другим следствием этого является более медленная скорость реакции отверждения в сухой пленке, чем в водной среде. Из известных подобных материалов для проведения дальнейшего эксперимента была выбрана эпоксидная смола ДЭГ-1, как отвечающая данным требованиям и наиболее распространенная в настоящее время.

Известно, что в обычном состоянии, при отверждении эпоксидных смол аминами, происходят реакции конденсации с участием эпоксидных и аминифункциональных групп, а также вновь образующихся гидроксильных групп. При этом важно отметить, что отдельный ввод компонентов (смолы и отвердителя) в бетонную смесь может быть малоэффективным в том случае, когда отвердитель имеет высокую растворимость в воде, что оказывает ингибирующее действие на отверждение полимера. В частности, увеличение прочностных показателей углеродо-фибробетона может быть достигнуто при использовании именно предварительно смешанных друг с другом компонентов - отвердителя и смолы.

Количество вводимого отвердителя зависит от содержания эпоксигрупп или от эпоксидного числа, молярной массы отвердителя, а также количества активных атомов водорода, которое содержится в аминных группах. При использовании отвердителя №921, в соответствии с рекомендациями производителя, его оптимальной дозировкой считается 50% от количества вводимой смолы. Такое содержание отвердителя было использовано на всех этапах выполнения экспериментальной части исследования (далее по тексту работы дозировки смолы ДЭГ-1 в составах бетонах включают в себя массу отвердителя).

Дополнительной причиной, обуславливающей выбор эпоксидной смолы ДЭГ-1 для дальнейших исследований являлась значительная разница между краевым углом смачивания фаз в смеси, который для кварцевого песка находится в диапазоне

75...86°, порошкообразного материала (портландцемента) - 58...90°, углеродного волокна 11...40°. При совместном перемешивании смеси наиболее предпочтительной поверхностью, на которой будет «удерживаться» эпоксидной смола ДЭГ-1 является углеродное волокно, за счет наименьшего угла смачивания из всех фаз смеси.

Для оценки структуры волокна в теле бетона с содержанием эпоксидной смолы ДЭГ-1 были проведены дополнительные исследования структуры на электронном растровом микроскопе. Результаты представлены на рисунках 5 а...г.

Представленное на рисунках 5 а и 5 б волокно использовано в составе без добавок. На снимках видно, что углеродное волокно имеет гладкую поверхность и не сцепляется с бетонной матрицей. При этом, на рисунках 5 в и 5 г представлены снимки волокна из бетона с эпоксидной смолой, на которых отчетливо видны мелкокристаллические продукты гидратации портландцемента на поверхности волокон, которые обеспечивают их повышенное сцепление с бетоном и увеличивают эффективность его применения в исследуемом композите. Именно этим объясняется прирост прочности при испытаниях данного состава с содержанием как смолы, так и углеродного волокна.

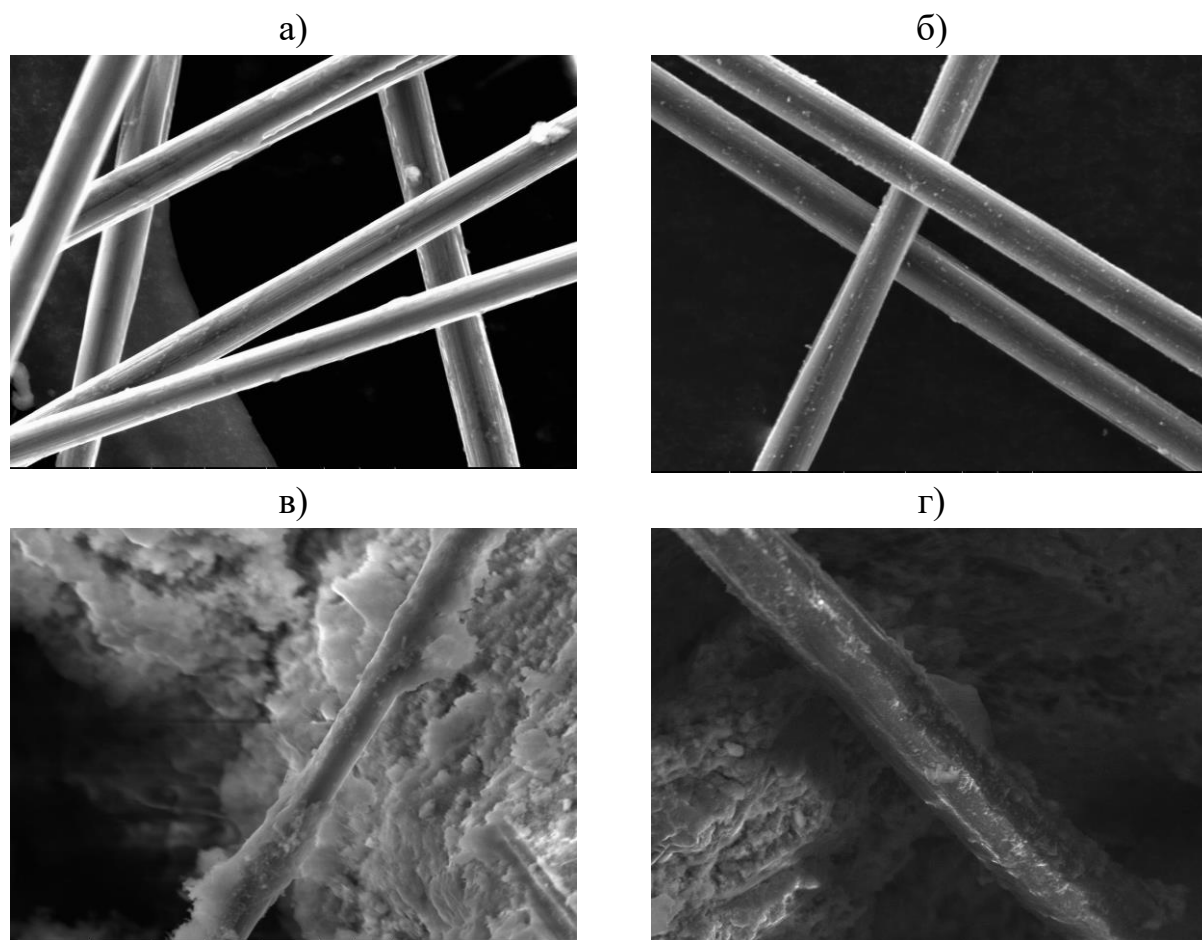
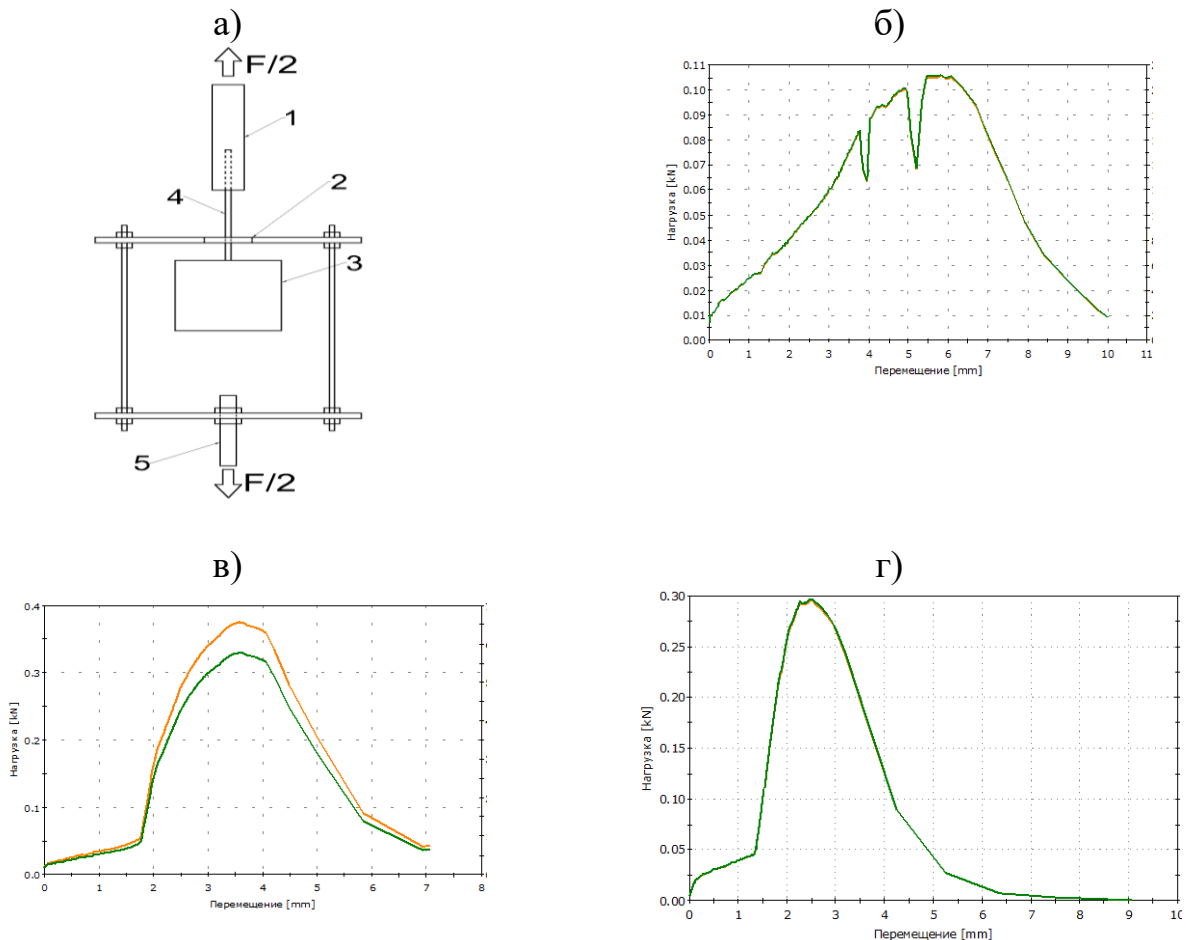


Рисунок 5 - Микроструктура образцов

а), б) образец волокна из бетона без добавок; в), г) образцы волокна из бетона с эпоксидной смолой ДЭГ-1

Дополнительно был выполнен эксперимент по определению сцепления между волокном и цементно-песчаной матрицей, схема испытания которого приведена на рисунке 6 а. Типовые графики «нагрузка–деформация» полученные при проведении испытаний приведены на рисунке 6 б...г.



1 – алюминиевая трубка, 2 – пучок углеродных волокон, 3 – стальная пластина, 4 – бетонный куб, 5 – стержень для фиксации рамы

Рисунок 6 – Результаты испытаний по определению вырыва пучка волокон из бетонной матрицы

а) схема испытаний; б) диаграмма «нагрузка–деформация» образца без добавок; в и г) диаграмма «нагрузка–деформация» образца со смолой ДЭГ-1

Для проведения испытаний подготавливали серию образцов для каждого типа бетонной матрицы. С одной стороны собранные в «пучок» углеродные волокна помещают в металлическую гильзу и заделывают эпоксидной смолой, а другую сторону «пучка» погружают в куб со стороной 20 мм, заполненный бетоном. Прочность бетонной матрицы контролируют по контрольным образцам-кубам со стороной не менее 7 см. Для исключения влияния дополнительного обжатия на волокно, заделанное в бетон, использовалось специальное удерживающее металлическое устройство из двух жестких пластин и 4 стержней. После закрепления образца с рамой на

испытательном стенде, создается предварительное усилие натяжения образца от 20 до 40 Н. После чего начинают нагружение образца с постоянной скоростью 5 Н/сек.

По результатам проведенного эксперимента установлено, что:

- нагрузка при вырыве углеродного волокна из бетона без добавки эпоксидной смолы ДЭГ-1 составила 0,05... 0,16 кН;

- нагрузка при вырыве углеродного волокна из бетона с добавлением эпоксидной смолы ДЭГ-1 составила 0,21...0,34 кН, т.е. увеличилась в среднем в 2,5 раза.

Для определения влияния эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 были проведены испытания по определению прочностных характеристик контрольных составов с добавкой. Дозировка смолы варьировалась от 0,5 до 2,5 % от массы цемента. Для полученных образцов бетона определялись прочность на сжатие и на растяжение при изгибе в проектном возрасте (28 суток). Результаты испытаний приведены на рисунках 7, 8.

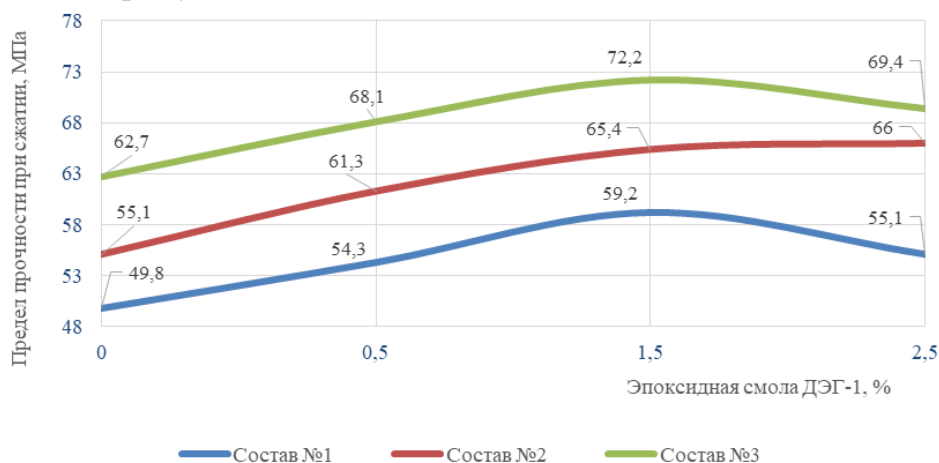


Рисунок 7 – Результаты определения прочности при сжатии составов с эпоксидной смолой ДЭГ-1

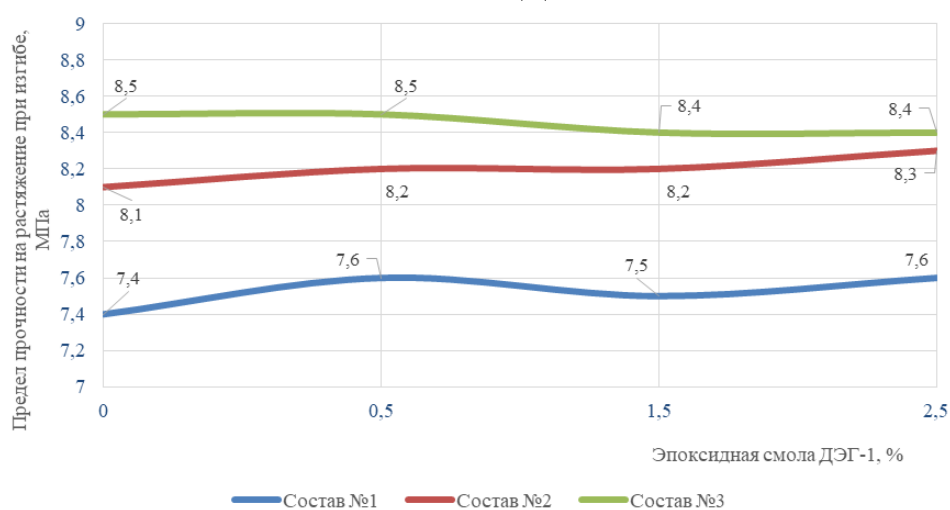


Рисунок 8 – Результаты определения прочности на растяжение при изгибе составов с эпоксидной смолой ДЭГ-1

На основании проведенных испытаний установлено, что введение в состав эпоксидной смолы с отвердителем позволяет увеличить прочность на сжатие контрольных составов на 9,4...10,3 МПа. При этом, следует отметить, что введение в состав добавки не влияет на способность бетона выдерживать растягивающие нагрузки, т.к. прочность на растяжение при изгибе практически не изменилась. По результатам данных испытаний, определена оптимальная дозировка ДЭГ-1, которая составляет 1,5% от массы вяжущего (цемента).

Следующий этап эксперимента состоял в определении оптимального состава с добавкой и дисперсным армированием. Для этого были подготовлены образцы, с проведением дальнейших испытаний по определению прочности, из бетонных смесей с различным содержанием углеродного волокна (от 1 до 3 кг/м³) и добавкой смолы ДЭГ-1 в количестве 1,5% от массы цемента. Результаты испытаний приведены на рисунках 9, 10.

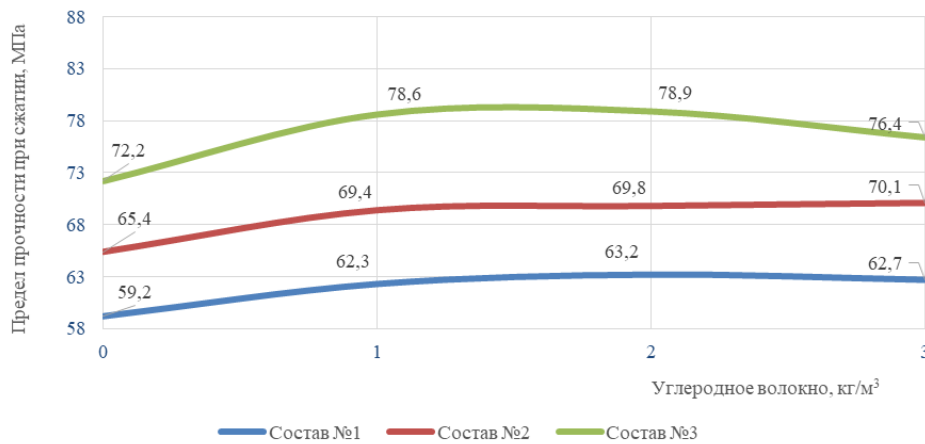


Рисунок 9 – Результаты определения прочности при сжатии составов с эпоксидной смолой ДЭГ-1 в количестве 1,5 % и углеродным волокном

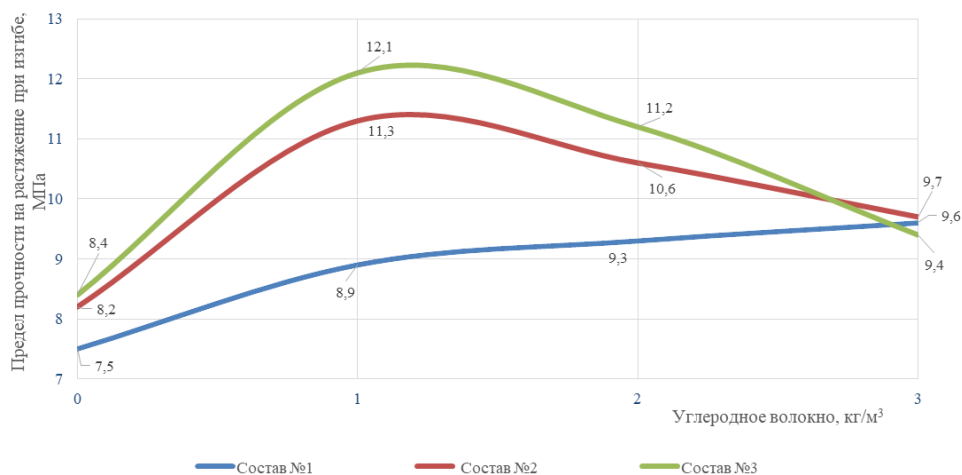


Рисунок 10 – Результаты определения прочности на растяжение при изгибе составов с эпоксидной смолой ДЭГ-1 в количестве 1,5 % и углеродным волокном

В результате проведенных исследований установлено, что при содержании углеродного волокна 1,0 кг/м³:

- предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток возрастает с 62,7 до 78,6 МПа (увеличение на 25,4%);

- предел прочности на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток возрастает с 8,5 до 12,1 МПа, (увеличение на 42,4%).

Оптимальная дозировка углеродного волокна составляет 1...1,5 кг/м³, а при ее увеличении прочность при сжатии незначительно изменяется, а прочность на растяжение при изгибе существенно снижается.

Результаты проведенных исследований позволили установить, что эффективное количество смолы ДЭГ-1 в разрабатываемых бетонах – от 1,0 до 2,0 % от массы цемента, количество углеродного волокна – от 0,5 до 1,5 кг/м³. Для определения оптимального содержания волокна и смолы ДЭГ-1 в дисперсно-армированном бетоне с учетом водоцементного отношения использовано математическое планирование эксперимента. Принятые факторы (водоцементное отношение, содержание углеродного волокна и смолы ДЭГ-1) и уровни их варьирования приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Факторы и уровни варьирования

| Факторы | Обозначение | Уровни варьирования | | |
|---|----------------|---------------------|------|------|
| | | -1 | 0 | +1 |
| Водоцементное отношение, В/Ц | X ₁ | 0,35 | 0,40 | 0,45 |
| Содержание углеродного волокна, кг/м ³ | X ₂ | 0,5 | 1,0 | 1,5 |
| Содержание смолы ДЭГ-1, % от массы цемента | X ₃ | 1,0 | 1,5 | 2,0 |

В результате проведенных вычислений получены следующие математические модели для проектирования бетонов с углеродным волокном и смолой ДЭГ-1 в кодированных факторах:

$$R_{\text{сж}} = 69,6 - 7,9X_1 + 1,2X_2 + 1,5X_3 + 0,4X_1^2 - 0,9X_2^2 - 0,7 X_1 X_2;$$

$$R_{\text{изг}} = 11,3 - 1,4X_1 + 0,2X_2 + 0,7X_3 - 0,9X_1^2 - 0,9X_2^2.$$

Изолинии регрессионных моделей для прочности при сжатии и растяжения при изгибе для водоцементного отношения равного 0,4, приведены на рисунках 11 и 12.

Анализ полученных уравнений регрессии позволил определить дозировки ДЭГ-1 – 1,5 % и УВ – 1 кг/м³, обеспечивающие оптимальные прочностные характеристики фибробетона.

Поскольку к исследуемому бетону в соответствии с его областью применения предъявляются повышенные требования по физико-механическим и эксплуатационным характеристикам, следующий этап эксперимента был направлен на

определение марки по морозостойкости (F_2) по ГОСТ 10060 и марки по водонепроницаемости (W) по ГОСТ 12730.5 оптимальных составов. Результаты испытаний представлены в таблицах 5 и 6.

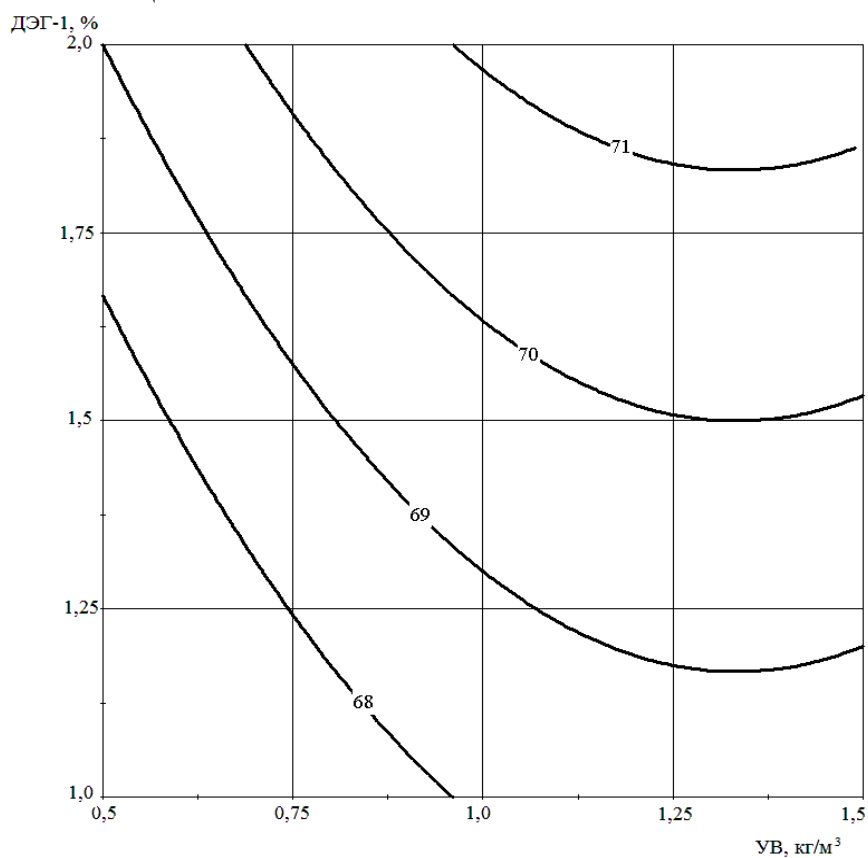


Рисунок 11 - Влияние содержания УВ и ДЭГ-1 на прочность при сжатии фибробетона

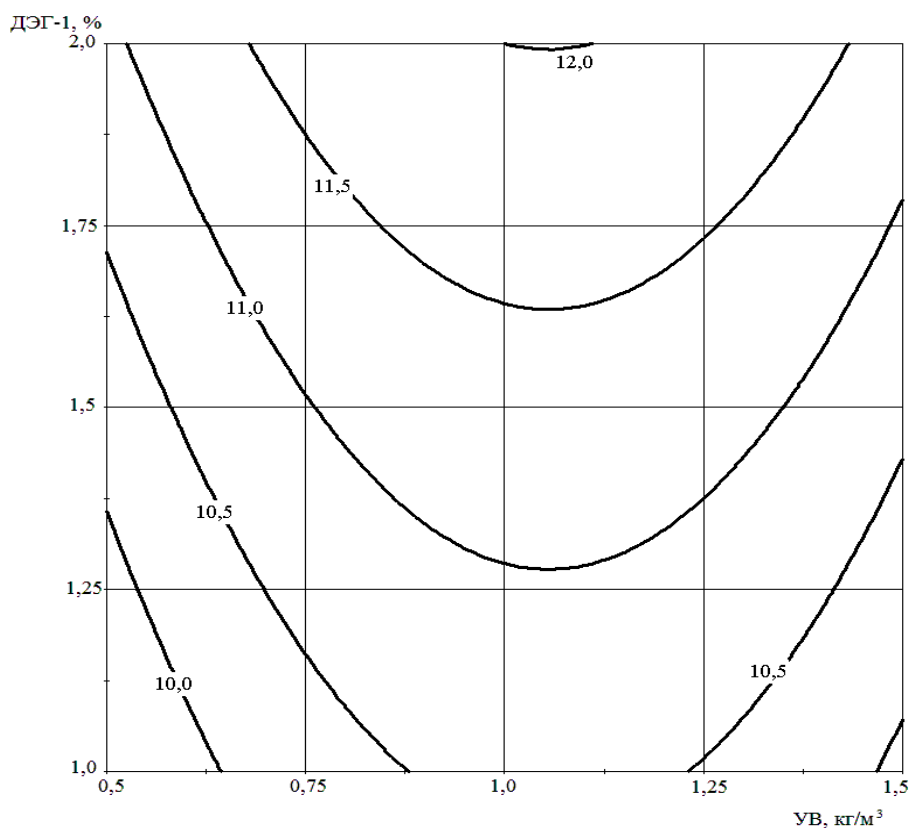


Рисунок 12 - Влияние содержания УВ и ДЭГ-1 на прочность на растяжение при изгибе фибробетона

Таблица 5 – Результаты по определению морозостойкости исследуемых составов

| № п/п | Состав бетона | Количество циклов, шт / проектная марка по морозостойкости | Доверительный интервал контрольных образцов (X_{\min}^I), МПа | Доверительный интервал основных образцов (X_{\min}^{II}), МПа | Соотношение интервалов |
|-------|--|--|---|---|------------------------|
| 1 | Контрольный состав | 10/150 | 61,7 | 59,4 | 0,96 |
| 2 | | 20/200 | 61,2 | 55,4 | 0,91 |
| 3 | Состав с ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 37/300 | 68,5 | 64,5 | 0,94 |
| 4 | | 55/400 | 65,4 | 59,5 | 0,91 |
| 5 | Состав с углеродным волокном (1 кг/м³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 37/300 | 74,0 | 70,1 | 0,95 |
| 6 | | 55/400 | 75,0 | 68,7 | 0,92 |

В ходе проведенных испытаний установлено, что введение в состав полимерной добавки и углеродного волокна значительно улучшает эксплуатационные характеристики материала. При этом, увеличение происходит в первую очередь за счет уплотнения структуры материала при введении эпоксидной смолы ДЭГ-1. Прирост морозостойкости составил две марки (с F₂₀₀ до F₄₀₀), водонепроницаемости пять марок (с W12 до W20).

Таблица 6 – Результаты по определению водонепроницаемости фибробетона

| № п/п | Состав бетона | Параметр воздухопроницаемости бетона (a_c , $\text{см}^3/\text{с}$) отдельных образцов | | | | | | Среднее значение a_c , $\text{см}^3/\text{с}$ | Марка W |
|-------|---|---|--------|---------------|---------------|--------|---------------|--|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| 1 | Контрольный состав | 0,0392 | 0,0501 | 0,0346 | 0,0392 | 0,0497 | 0,0359 | 0,0392 | 12 |
| 2 | Состав с ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 0,0085 | 0,0106 | 0,0107 | 0,0098 | 0,0083 | 0,0077 | 0,0091 | 20 |
| 3 | Состав с углеродным волокном ($1 \text{ кг}/\text{м}^3$) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 0,0095 | 0,0105 | 0,0096 | 0,0096 | 0,0080 | 0,0097 | 0,0097 | 20 |

Подробное изучение свойств материала обусловлено специальной областью применения углеродофибробетона, а также высокой стоимостью материала. Соответственно, его применение возможно только после предварительного расчета и определения целесообразности, исходя из сведений о данных эксплуатационных и физико-механических характеристиках. Результаты проведенных испытаний представлены в таблицах 7...10.

Таблица 7 – Результаты по определению ударной вязкости фибробетона

| № п/п | Состав бетона | Удельная ударная вязкости отдельных образцов, A_i , Дж/см ³ | | | Удельная ударная вязкость серии, A_j , Дж/см ³ | Изменение удельной ударной вязкости, % |
|-------|--|--|------|------|--|---|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | Контрольный состав | 47,7 | 50,8 | 50,2 | 49,6 | - |
| 2 | Состав с углеродным волокном ($1 \text{ кг}/\text{м}^3$) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 87,3 | 80,9 | 88,2 | 85,5 | 72,3 |
| 3 | Состав с углеродным волокном ($2 \text{ кг}/\text{м}^3$) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 94,0 | 91,9 | 96,9 | 94,3 | 90,2 |
| 4 | Состав с углеродным волокном ($3 \text{ кг}/\text{м}^3$) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 70,4 | 82,5 | 75,4 | 76,1 | 53,5 |

После проведения испытаний сделан вывод о том, что добавление углеродного волокна в составы бетонов приводит к увеличению ударной прочности, определяемой по значению удельной ударной вязкости, однако эффективность применения зависит от дозировки. При содержании УВ в составе бетона в количестве $1 \text{ кг}/\text{м}^3$, его удельная ударная вязкость увеличивается на 72,3%, в количестве $2 \text{ кг}/\text{м}^3$ – увеличивается на 90,2%, а при увеличении содержания волокна до $3 \text{ кг}/\text{м}^3$ прирост показателя составляет только 53,5%.

Таблица 8 – Результаты по определению трещиностойкости фибробетона

| № п/п | Состав бетона | Условный критический коэффициент интенсивности напряжений, K_c^* , МПа·м ^{0,5} | | | K_c^* серии образцов, МПа·м ^{0,5} | Изменение K_c^* , % |
|-------|---|---|------|------|--|-----------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | Контрольный состав | 7,01 | 7,24 | 7,16 | 7,14 | - |
| 2 | Состав с углеродным волокном (1 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 7,67 | 7,69 | 7,27 | 7,54 | 5,70 |
| 3 | Состав с углеродным волокном (2 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 7,76 | 7,85 | 7,83 | 7,81 | 9,48 |
| 4 | Состав с углеродным волокном (3 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 7,25 | 7,08 | 7,40 | 7,24 | 1,49 |

Введение углеродного волокна в состав исследуемого бетона в количестве 1, 2 и 3 кг/м³ положительно влияет на показатель трещиностойкости и приводит к увеличению условного критического коэффициента интенсивности напряжений на 5,70, 9,48 и 1,49 % соответственно. При максимальной исследуемой дозировке волокна наблюдается минимальный рост показателя трещиностойкости.

Таблица 9 – Результаты по определению истираемости исследуемых составов

| № п/п | Состав бетона | Истираемость отдельных образцов, G_i , г/см ² | | | Истираемость серии \bar{G}_c , г/см ² | Изменение истираемости, % |
|-------|---|--|------|------|--|---------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | Контрольный состав | 0,28 | 0,32 | 0,31 | 0,30 | - |
| 2 | Состав с углеродным волокном (1 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 0,24 | 0,26 | 0,23 | 0,24 | -19,8 |
| 3 | Состав с углеродным волокном (2 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 0,20 | 0,17 | 0,19 | 0,19 | -38,5 |
| 4 | Состав с углеродным волокном (3 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 0,26 | 0,24 | 0,25 | 0,25 | -17,6 |

На основании проведенных исследований установлено, что истираемость контрольного состава бетона класса без углеродного волокна и эпоксидной смолы составляет 0,30 г/см². При этом, введение УВ в состав тяжелого бетона приводит к уменьшению его истираемости. При содержании УВ в тяжелом бетоне в количестве 1 кг/м³, его истираемость снижается на 19,8%, при содержании 2 и 3 кг/м³ - на 38,5 и 17,6 % соответственно.

Таблица 10 – Результаты по определению модуля упругости исследуемых составов

| № п/п | Состав бетона | Модуль упругости отдельных образцов, МПа·10 ⁴ | | | Модуль упругости серии образцов, МПа·10 ⁴ | Изменение модуля упругости, % |
|-------|---|--|-----|-----|--|-------------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1 | Контрольный состав | 3,9 | 3,5 | 3,4 | 3,6 | |
| 2 | Состав с углеродным волокном (1 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 4,3 | 4,1 | 4,2 | 4,2 | 16,7 |
| 3 | Состав с углеродным волокном (2 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 4,6 | 4,4 | 4,7 | 4,6 | 26,9 |
| 4 | Состав с углеродным волокном (3 кг/м ³) и ДЭГ-1 (1,5% от массы цемента) | 4,5 | 4,2 | 4,1 | 4,3 | 18,5 |

Установлено, что введение УВ в состав бетона в количестве 1, 2 и 3 кг/м³ увеличивает значение модуля упругости на 16,7, 26,9 и 18,5 % соответственно

На основании результатов выполненных испытаний сделан вывод о том, что при разработке составов бетонов содержание углеродного волокна в количестве более 2 кг/м³ является нецелесообразным, т.к. приводит к снижению эксплуатационных свойств.

При содействии специалистов ООО «Трансмост Сочи» был изготовлен элемент несъемной опалубки из разработанного мелкозернистого бетона с углеродным волокном. Формование элемента происходило в подготовленной форме непосредственно на объекте строительства: *«Создание сухогрузного района морского порта «Тамань», а именно: «Строительство объектов железнодорожной инфраструктуры участка от ПК 314 до ПК 362. Строительство железнодорожного путепровода на ПК 329+50»*. Площадь готового изделия составила 6,8 м². В результате использования данной несъемной опалубки получен суммарный экономический эффект в размере 6643,06 рублей за счет снижения трудозатрат при проведении строительного-монтажных работ, а также снижения затрат на защиту возводимой конструкции от воздействия окружающей агрессивной среды путем нанесения антикоррозийного покрытия и устройства гидроизоляции.

Также, следует отметить, что в ходе данного промышленного применения и расчета экономического эффекта не была учтена работа несъемной опалубки в конструкции, что дополнительно позволяет снизить геометрические размеры и массу конструкции и, соответственно, снизить ее стоимость.

Таким образом, промышленная апробация результатов исследования подтвердила целесообразность и экономическую эффективность применения высокопрочного мелкозернистого бетона с углеродным волокном и эпоксидной смолой ДЭГ-1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Установлен способ изготовления бетонных смесей с углеродным волокном, обеспечивающий его наилучшее равномерное распределение, и реализуемый в следующем порядке:

- совместная загрузка и перемешивание цемента, песка и углеродного волокна;
- частичное дозирование воды в смесь и перемешивание до получения марки по удобоукладываемости не выше Ж1;
- добавление оставшейся воды и перемешивание до получения требуемой марки по удобоукладываемости.

2) Установлено влияние углеродного волокна в количестве 1 кг/м^3 на свойства бетонных смесей:

- удобоукладываемость бетонных смесей марок П2 и выше снижается на единицу;
- удобоукладываемость бетонных смесей марок П1 и ниже не изменяется;
- расслаиваемость бетонных смесей марок по удобоукладываемости П1..П3 по значениям водоотделения и растовороотделения снижается в среднем в два раза;
- воздухововлечение подвижных смесей П1...П3 увеличилось на 0,5...0,9%, жестких смесей Ж1, Ж2 – до 0,1 %.

3) С использованием методов математического планирования эксперимента получены зависимости, определяющие влияние УВ на прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, плотность и водопоглощение фибробетонов при дозировке от 1 до 5 кг/м^3 и водоцементном отношении 0,4...0,58 в составе мелкозернистого бетона.

4) Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено методом электронной микроскопии, что при введении агрегативно-устойчивой эмульсии эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 в мелкозернистую бетонную смесь, на углеродных волокнах образуется устойчивый поверхностный слой смолы, который приводит к формированию мелкокристаллических продуктов гидратации портландцемента на границе «цементный камень-углеродное волокно».

5) Формирование мелкокристаллических продуктов гидратации портландцемента на границе «цементный камень-углеродное волокно» обеспечивает повышение сцепления волокон с цементным камнем - нагрузка при вырыве углеродного волокна из бетона с добавлением эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 возрастает с 0,05... 0,16 до 0,21...0,34 кН, т.е. увеличивается в среднем в 2,5 раза.

б) С использованием методов математического планирования эксперимента получены зависимости, определяющие влияние УВ при дозировке от 0,5 до 1,5 кг/м³, эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 в количестве от 1,0 до 2,0 % от массы цемента и водоцементного отношения от 0,35 до 0,45 на прочность при сжатии и прочность на растяжение при изгибе фибробетонов.

7) Установлены оптимальные дозировки эпоксидной смолы ДЭГ-1 с отвердителем №921 и углеродного волокна (1,5% от массы цемента и 1 кг/м³ соответственно), которые обеспечивают максимальное увеличение прочности фибробетонов на сжатие на 26,5...27,6 % и растяжение при изгибе на 30,0...42,4 %.

8) Установлено, что введение в состав ДЭГ-1 значительно повышает эксплуатационные свойства бетона, увеличение морозостойкости с F₂₀₀ до F₄₀₀, увеличение водонепроницаемости с W₁₂ до W₂₀.

9) По результатам проведенных испытаний бетонов с оптимальным количеством эпоксидной смолы ДЭГ-1 и отвердителем №921 (1,5% от массы цемента) и углеродным волокном, установлено:

а) морозостойкость и водонепроницаемость бетонов значительно повышаются с F₂₀₀ до F₄₀₀ и с W₁₂ до W₂₀ соответственно, за счет введения эпоксидной смолы;

б) введение УВ в составы бетонов приводит к увеличению ударной прочности, определяемой по значению удельной ударной вязкости. При содержании УВ в количестве 1 кг/м³, удельная ударная вязкость увеличивается на 72,3 %, при - 2 и 3 кг/м³ на 90,5...53,5%;

в) введение УВ в составы бетонов в количестве 1, 2 и 3 кг/м³ приводит к увеличению трещиностойкости, оцениваемой по условному критическому коэффициенту интенсивности напряжений, который повышается на 5,7, 9,5 и 1,5 % соответственно;

г) введение УВ в составы бетонов в количестве 1, 2 и 3 кг/м³ увеличивает значение модуля упругости на 16,7, 27,9 и 18,5 % соответственно, а также снижает истираемость на 19,8, 38,5 и 17,6 % соответственно.

10) Применение разработанного состава фибробетона с эпоксидной смолой ДЭГ-1 с отвердителем №921 и углеродным волокном для производства несъемной опалубки при возведении железобетонного ростверка при опытно-производственной апробации, позволило сократить трудозатраты, а также сократить время производства работ за счет исключения ряда операций из технологического процесса. Экономический эффект от применения несъемной опалубки, изготовленной из разработанного состава фибробетона, составил 6643,06 руб. на 6,8 м² конструкции.

11) Разработаны рекомендации по применению углеродного волокна для производства сборных и монолитных железобетонных конструкций

Рекомендации, разработанные по результатам проведенного исследования, могут быть использованы при применении углеродного волокна для производства сборных и монолитных железобетонных конструкций.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы является создание научных положений по усовершенствованию и усилению сцепления между углеродным волокном и цементно-песчаной матрицей за счет введения новых видов полимерных добавок с целью получения и использования высокопрочных фибробетонов с заданными свойствами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Соловьев В.Г., Нуртдинов М.Р., Кухарь И.Д., Беликов С.С., Матюшин Е.В. Повышение истираемости фибробетона за счет введения микрокремнезема // Транспортное строительство. 2018. №8. С. 19-21.
2. Соловьев В.Г., Бамматов А.А., Нуртдинов М.Р., Кухарь И.Д. Эффективность взаимодействия различных видов фибры с бетонной матрицей // Наука и бизнес: пути развития. 2018. №5. С. 57-61.
3. Соловьев В.Г., Нуртдинов М.Р., Кухарь И.Д. Применение водорастворимой эпоксидной смолы в мелкозернистых углеродофибробетонах // Перспективы науки. 2018. №6. С. 71-74.
4. Соловьев В.Г., Кухарь И.Д., Беликов С.С., Матюшин Е.В. Мелкозернистый бетон, дисперсно-армированный углеродным волокном // Транспортное строительство. 2018. №12. С. 3-6.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus:

5. Solov'Ev, V., Nurtdinov, M., Kukhar, I Effective concrete types with carbon fiber//MATEC Web of Conferences. 2018.193,03049. DOI: 10.1051/matecconf/201819303049

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

6. Кухарь И.Д. Актуальные вопросы применения полимерных добавок в фибробетоне // Сборник трудов конференции «Фундаментальные и прикладные науки сегодня». – М.: НИЦ Академический, 2018. С. 92-95.